

重力波観測を用いたマルチバースの検証

久木原 萌*・端山 和大

(令和3年5月25日受理)

Probing multiverse using gravitational wave observations

Moe KUKIHARA* and Kazuhiro HAYAMA

(Received May 25th, 2021)

Abstract

From the theory of the multiverse cosmology, it is possible that our universe collides with other universes locally in its history, which may result in local changes of the curvature of the spacetime. In this paper, we propose a method to probe the multiverse using gravitational wave observations for the first time. Our method firstly makes triangles using two detected gravitational wave sources and the Sun, and then measures the curvature of the triangles. We use 11 gravitational wave sources detected by LIGO and Virgo during O1 and O2, and make 55 triangles by combining them to measure their curvature. The curvature is measured by comparing the distance between two gravitational wave sources estimated by the gravitational wave observations with the one obtained with assumption of a simple model of the cosmological evolution.

As a result, we found that, for 43 of 55 triangles, the distances estimated by the model are greater than the ones obtained by the gravitational wave observations. This indicates a negative curvature, which may be due to the simplification of the cosmological evolution. For the rest 12, the distances are not determined because of uncertainty of the parameters of the gravitational wave observations. Further gravitational wave observations and more sophisticated model of the cosmological evolution is essential to test the multiverse cosmology observationally.

Keywords: gravitational wave observations, multiverse, spacetime geometry, cosmological evolution

1. はじめに

1929年にE.Hubbleによって宇宙膨張が発見され [1], 宇宙の最初は小さな1つの点だったのではないかと考えられるようになり, 宇宙の始まりが火の玉であったとするビッグバン理論がG.Gamowによって提唱された. 1965年の宇宙マイクロ波背景放射の初観測 [2] や1989年の宇宙背景放射探査機COBEによる宇宙初期に起源を持つ温度ゆらぎの発見 [3] によって宇宙初期が火の玉であったという理論は観測からも支持された. しかし, ビッグバン理論には一様性問題や平坦性問題などの問題がある. この問題を解決する理論としてインフレーション理論が提唱されたが [4-6], インフレーション理論にも次のような問題がある. す

なわち, 場の理論から予言される真空のエネルギー密度の平均値は, $\rho_{\Lambda} \sim 10^{113} \text{ J/m}^3$ であるのに対し, 現在観測された真空エネルギー密度は, $\rho_{\Lambda} \sim 10^{-9} \text{ J/m}^3$ である. 理論値と観測値との間には, 大きさに約120桁の違いが生じてしまう [7]. この問題を解決する理論としてマルチバース宇宙論がある. マルチバース宇宙論では, 様々な真空のエネルギー密度を持つ宇宙が生成され, 現在の真空のエネルギー密度の宇宙に偶々我々が誕生したと考える. このようにマルチバース宇宙論では, 複数の宇宙の生成が自然に予想され, そのため我々の宇宙がほかの宇宙と接触し, 接触面では局所的な曲率の変化がおきている可能性がある [8]. 宇宙マイクロ波背景放射観測衛星WMAPの曲率測定 [9,10] では, 宇宙全体の曲率は平坦であるという結果が得ら

れたが、CMB 偏光観測で渦状の偏光成分は未発見であるなど不確かさも含まれている。宇宙の曲率の符号は今後の観測でさらに精密化していく必要がある。

過去に宇宙間の接触があったかどうかを検証する研究は、宇宙の曲率を調べる以外に宇宙間の接触面で起きる温度変動を探索するという研究がある。この温度変動は宇宙マイクロ波背景放射上に円状の模様として現れ、それを電波観測によって調べるものである [11,12]。その結果、WMAP の観測データの中から宇宙間の接触で現れる円状の模様と矛盾しない4つの領域が報告された [13,14]。ただし時間の経過によって宇宙膨張が進むに伴い、初期宇宙の構造を希薄すると同様に衝突の影響も希薄化する傾向があることに注意が必要である。

本論文は、天体単体では最深の現象が検出可能 [15] であり、電波観測で行われた研究とは独立した観測手段である、重力波観測を用いてマルチバースを検証する手法を初めて提案する。2章では宇宙の局所的な曲率の測定方法、3章では結果と考察について述べる。

2. 宇宙の局所的な曲率の測定

GW150914, GW151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170729, GW170809, GW170814, GW170817, GW170818, GW170823 は LIGO, Virgo による観測で検出されている重力波である [16]。11 の重力波源のうち2つと、太陽を用いて三角形を構成し、重力波源2点間の距離を重力波観測による推定値と平坦宇宙モデルによる推定値を55通りの組み合わせの領域 (Table 1) ごとに比較することで宇宙の局所的な曲率を測定した。

2.1 重力波観測による推定値

重力波到来方向確率マップ [16] の島内に重力波が存在している確率は50%および90%以上である。存在確率90%以上の領域中で確率の最も高い天球位置を重力波源 (Fig.1) とした。

Table 1 55 combinations of two gravitational sources for making triangles including the Sun.

index	combination	index	combination
area 1	GW150914,GW151012	area 29	GW170104,GW170729
area 2	GW150914,GW151226	area 30	GW170104,GW170809
area 3	GW150914,GW170104	area 31	GW170104,GW170814
area 4	GW150914,GW170608	area 32	GW170104,GW170817
area 5	GW150914,GW170729	area 33	GW170104,GW170818
area 6	GW150914,GW170809	area 34	GW170104,GW170823
area 7	GW150914,GW170814	area 35	GW170608,GW170729
area 8	GW150914,GW170817	area 36	GW170608,GW170809
area 9	GW150914,GW170818	area 37	GW170608,GW170814
area 10	GW150914,GW170823	area 38	GW170608,GW170817
area 11	GW151012,GW151226	area 39	GW170608,GW170818
area 12	GW151012,GW170104	area 40	GW170608,GW170823
area 13	GW151012,GW170608	area 41	GW170729,GW170809
area 14	GW151012,GW170729	area 42	GW170729,GW170814
area 15	GW151012,GW170809	area 43	GW170729,GW170817
area 16	GW151012,GW170814	area 44	GW170729,GW170818
area 17	GW151012,GW170817	area 45	GW170729,GW170823
area 18	GW151012,GW170818	area 46	GW170809,GW170814
area 19	GW151012,GW170823	area 47	GW170809,GW170817
area 20	GW151226,GW170104	area 48	GW170809,GW170818
area 21	GW151226,GW170608	area 49	GW170809,GW170823
area 22	GW151226,GW170729	area 50	GW170814,GW170817
area 23	GW151226,GW170809	area 51	GW170814,GW170818
area 24	GW151226,GW170814	area 52	GW170814,GW170823
area 25	GW151226,GW170817	area 53	GW170817,GW170818
area 26	GW151226,GW170818	area 54	GW170817,GW170823
area 27	GW151226,GW170823	area 55	GW170818,GW170823
area 28	GW170104,GW170608		

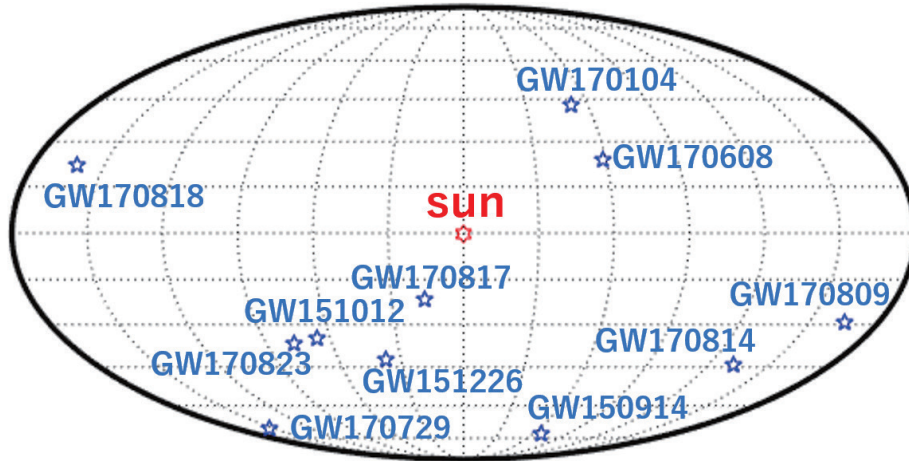


Fig.1 Most probable sky locations of the detected gravitational waves in 2015-2017 in the Mollweide coordinates.

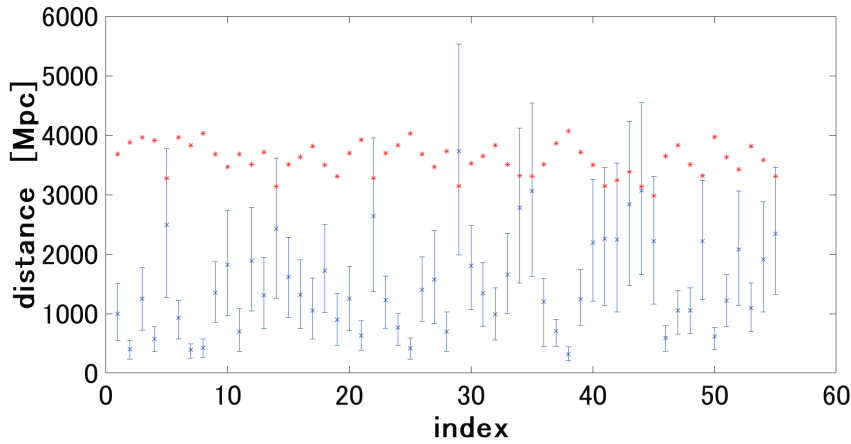


Fig.2 Blue plots show the distances between gravitational wave sources estimated by the gravitational wave observations with uncertainty. Red plots show the distances calculated using a simple model of the cosmological evolution.

Figure 1 のなかで太陽と重力波源を用いて三角形を構成した。重力波観測によって推定される重力波源と太陽との間の距離とそのなす角を用い、重力波源 2 点間の距離を推定した。

その波長はもとの $1+z$ 倍になる。現在の宇宙のスケール因子 $a(t_0) = 1$ とすると、次の関係式が成り立つ。

$$\frac{a(t)}{a(t_0)} = \frac{1}{1+z}$$

2.2 平坦宇宙モデルによる推定値

一様・等方膨張宇宙を記述する 4 次元計量として次の形を考える。

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-Kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

c : 光速, $a(t)$: 時刻 t でのスケール因子,
 r : 3 次元球座標における動径,
 θ, ϕ : 3 次元球座標における偏角, K : 定数

自然単位系を用いると曲率ゼロ ($K=0$) の宇宙を表す解は,

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)[dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)]$$

である。赤方偏移 z の重力波が地球で観測されるとき、

ここで、平坦宇宙モデルにより重力波源 2 点間の距離を推定する際、重力波源が宇宙初期に発生したものとし、宇宙の進化過程で暗黒物質や銀河等のほかの天体からの重力の影響を受けないと仮定する [17,18]。 z は 2 つの重力波源における赤方偏移の平均とし、2 点間の距離は z での宇宙の大きさと推定した。

2.3 55 領域における各推定値の比較

Figure 2 は各三角形領域での重力波観測による波源間の距離と平坦宇宙モデルによる波源間の距離を表している。青点は重力波観測によるものである。代表点は、重力波到来方向確率の最も高い点と太陽との距離であり、エラーバーには太陽と重力波源間の距離や重力波到来方向の不確かさが反映されている。赤点は、

Table 2 Curvatures of the 55 triangles.

index	curvature	index	curvature
area 1	negative	area 29	Indistinguishable
area 2	negative	area 30	negative
area 3	negative	area 31	negative
area 4	negative	area 32	negative
area 5	Indistinguishable	area 33	negative
area 6	negative	area 34	Indistinguishable
area 7	negative	area 35	Indistinguishable
area 8	negative	area 36	negative
area 9	negative	area 37	negative
area 10	negative	area 38	negative
area 11	negative	area 39	negative
area 12	negative	area 40	negative
area 13	negative	area 41	Indistinguishable
area 14	Indistinguishable	area 42	Indistinguishable
area 15	negative	area 43	Indistinguishable
area 16	negative	area 44	Indistinguishable
area 17	negative	area 45	Indistinguishable
area 18	negative	area 46	negative
area 19	negative	area 47	negative
area 20	negative	area 48	negative
area 21	negative	area 49	negative
area 22	Indistinguishable	area 50	negative
area 23	negative	area 51	negative
area 24	negative	area 52	negative
area 25	negative	area 53	negative
area 26	negative	area 54	negative
area 27	negative	area 55	Indistinguishable
area 28	negative		

平坦宇宙モデルによる 2 点間の距離である。

Table 2 は各領域の曲率を表している。重力波観測による重力波源 2 点間に距離と、仮定に基づいた平坦宇宙モデルによる重力波源 2 点間の距離を比較することで宇宙の曲率を推定した。重力波源 2 点間の距離の各推定値が等しくなる場合、宇宙の局所的な曲率はゼロとなる。重力波観測による推定値が平坦宇宙モデルによる推定値よりも大きくなる場合は正の曲率を持ち、小さくなる場合は負の曲率を持つといえる。

43 の領域では、宇宙モデルによる距離の推定値が重力波観測による距離の推定値よりも常に大きくなったことから負の曲率を示した。12 の領域（領域 5, 領域 14, 領域 22, 領域 29, 領域 34, 領域 35, 領域 41, 領域 42, 領域 43, 領域 44, 領域 45, 領域 55）では平坦宇宙モデルによる推定値が重力波観測による推定値のエラーバーに含まれる結果となり、距離の大小比較が困難な結果となった。

3. まとめと考察

本論文は、マルチバース宇宙論で予想される宇宙間の接触を観測的に調べた。重力波観測を用いてマルチバースを検証する手法を初めて提案するものである。LIGO, Virgo による観測で検出されている 11 の重力波源のうち 2 つと太陽を用いて三角形を構成し、重力波源 2 点間の距離の各推定値を比較することで、宇宙の局所的な曲率を測定した。43 の領域では、宇宙モデルによる距離の推定値が重力波観測による距離の推定値よりも常に大きくなったことから負の曲率を示した。これは宇宙モデルの単純化による影響があり、今後、ほかの天体から与えられる影響や赤方偏移のエラーバーを考慮するなどモデルの精密化が必要である。12 の領域（領域 5, 領域 14, 領域 22, 領域 29, 領域 34, 領域 35, 領域 41, 領域 42, 領域 43, 領域 44, 領域 45, 領域 55）では平坦宇宙モデルによる推定値が重力波観測による推定値のエラーバーに含まれる結果となり、距離の大小比較が困難な結果となった。今後、曲率の符号を制限するため、誤差の低減が重要

となる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K03896 の助成を受けたものである。

This research has made use of data, software and/or web tools obtained from the Gravitational Wave Open Science Center (<https://www.gw-openscience.org>), a service of LIGO Laboratory, the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration. LIGO is funded by the U.S. National Science Foundation. Virgo is funded by the French Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), the Italian Istituto Nazionale della Fisica Nucleare (INFN) and the Dutch Nikhef, with contributions by Polish and Hungarian institutes.

参考文献

- [1] E. Hubble, PNAS, **15**, 168-173 (1929).
- [2] A.A.Penzias, R.W.Willson, Astrophysical Journal, **142**, 419-421 (1965).
- [3] G.F.Smoot, *et al.*, Astrophysical Journal Letters, **396**, p.L1 (1992).
- [4] K. Sato, Physics Letters.,**99**, 1, 66-70 (1981).
- [5] K. Sato, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **195**, 467-479 (1981).
- [6] B.Einhorn Martin, K.sato, Nuclear Physics B, **180**, 3, 385-404 (1981).
- [7] S.Weinberg, The cosmological constant problems, Red. Mod. Phys. **61**, 1 (1989).
- [8] A.Lue, G.Starkman, Physical Review D, **67**, 6, 064002 (2003).
- [9] A. Riess, *et al.*, Astrophys. J., **560**, 49 (2001).
- [10] D.N.Spergel, *et al.*, The Astrophysical Journal Supplement Series, **148**, 1, 175-194 (2003).
- [11] Spencer Chang, *et al.*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, **32**, 4, 025 (2009).
- [12] M.Kleban, T.S. Levi, K.Sigurdson, Physical Review D, **87**, 4, 041301 (2013).
- [13] S.M.Feeney, *et al.*, Physical Review Letters, **107**, 7, 071301 (2011).
- [14] S.M.Feeney, *et al.*, Physical Review D, **84**, 4, 043507 (2011).
- [15] A. Gupta, D.Fox, B.S.Sathyaprakash and B.F.Schutz, The Astrophys. J., **886**, 1 (2019).
- [16] B.P. Abbott, *et al.*, Physical Review X, **9**, 3, 031040 (2019).
- [17] V. Bromm, N. Yoshida, C. McKee and L. Hernquist, Nature, **459**, 49 (2009).
- [18] V. Bromm and N. Yoshida, Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, **49**, 373 (2011).